(19)日本国特許庁（ＪＰ）　(12) 公開特許公報（Ａ）　(11)特許出願公開番号

特開平7－225200

(43)公開日　平成７年(1995)８月22日

(51)Int.Cl.[6]	識別記号	庁内整理番号	ＦＩ	技術表示箇所
Ｇ０１Ｎ　22/00	Ｙ			
	Ｊ			
Ｇ０１Ｒ　27/26	Ｈ			

審査請求　未請求　請求項の数19　ＯＬ　（全 12 頁）

(21)出願番号　特願平6－305255

(22)出願日　平成６年(1994)12月８日

(31)優先権主張番号　Ｐ　４３　４２　５０５．４

(32)優先日　1993年12月８日

(33)優先権主張国　ドイツ（ＤＥ）

(71)出願人　594200954
ヌーテック　ゲーエムベーハー
ＮＵ－ＴＥＣＨ　ＧｍｂＨ
ドイツ連邦共和国　ノイミュンスター　24536，イルザール　5

(71)出願人　594200965
ゲルト　スタンゲ
Ｇｅｒｄ　Ｓｔａｎｇｅ
ドイツ連邦共和国　ノルトルフ　24589，クロンカンプ　39

(72)発明者　ゲルト　スタンゲ
ドイツ連邦共和国　ノルトルフ　24589，クロンカンプ　39

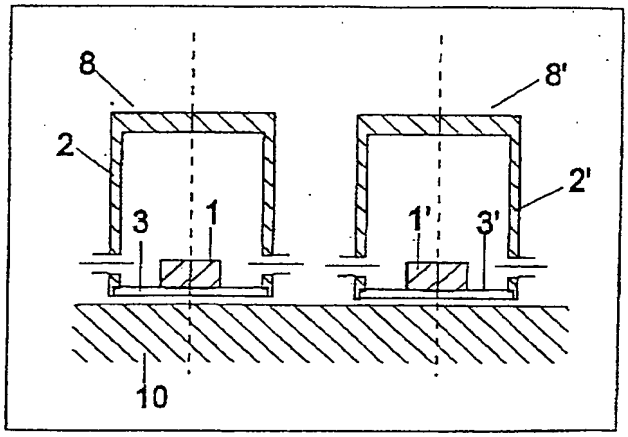
(74)代理人　弁理士　山本　秀策

(54)【発明の名称】　物質の複素誘電率の測定方法および装置

(57)【要約】　（修正有）

【目的】　試料の存在に起因する離調量を評価することにより、試料の複素誘電率を測定する方法およびその装置を提供する。

【構成】　同一構造を有する２つのｒｆ共振器８、８′を用い、各共振器８、８′は、第１の部分２、２′と、交流フィールドに対して透過性を有している第２の部分３、３′とを備えた筐体の中に誘電固体共振器１、１′とを有している。両ｒｆ共振器は、導体からなる各第１の部分２、２′が相互作用に対してシールドを行うように、かつ電磁フィールドに対して透過性を有している第２の部分３、３′が測定すべき物質に対向するような相対位置に設置される。ｒｆ共振器８、８′の共振周波数は、測定される物質の非存在下において、共通の動作周波数がｒｆ共振器８、８′の共振周波数の中間に位置するように選択される。



1

【特許請求の範囲】

【請求項１】物質の存在に起因するｒｆ共振器の離調量を分析することによって、該物質の複素誘電率を決定するための装置であって、

該装置は、可変高周波数の電磁場をｒｆ共振器に送るためのｒｆ送信手段と、共振器フィールドのための受信手段と、該受信手段に接続され、受け取ったｒｆ信号の振幅を決定するための測定手段とを備えており、

該装置は、同一構造を有する２つのｒｆ共振器を有し、該ｒｆ共振器の各々は、第１の部分と第２の部分とを備えている筐体の中に誘電固体共振器を有し、該第１の部分は、導体材料によって該固体共振器を少なくとも１つの半球領域において囲んでおり、該第２の部分は、交流電磁フィールドに対して透過性を有しており、かつ該ｒｆ共振器の各々は該ｒｆ共振器の共振周波数を調整するための手段を有しており、

該２つのｒｆ共振器は、導体からなる該第１の部分の各々が該ｒｆ共振器を相互作用からシールドするように、かつ交流電磁フィールドに対して透過性を有している該第２の部分が該測定すべき物質に対向するような相対位置に位置するように調節され、

該装置は更に、該ｒｆ共振器の両方に同一周波数（ω）を有するｒｆフィールドが供給されるように該ｒｆ送信手段および／または該ｒｆ共振器を制御するように、かつ該周波数（ω）が、異なる値に前もって調整された該第１および第２のｒｆ共振器の共振周波数（ω_{o1}およびω_{o2}）の中間に、該測定される物質が存在しない場合には位置するように調節される制御分析手段を備えており、該制御分析手段は該受け取ったｒｆ信号の各々の振幅の測定値を受け取り、かつ該振幅の測定値の和および差値から該複素誘電率を決定するように調整される装置。

【請求項２】前記筐体の前記第２の部分が、誘電体からなる請求項１に記載の装置。

【請求項３】前記筐体の誘電体からなる前記第２の部分が、プラスチックまたはセラミック材料からなる請求項１に記載の装置。

【請求項４】各ｒｆ共振器の前記筐体の前記第１の部分が、平らな基底領域の１つが完全にまたは部分的に開いた円柱状金属からなり、前記第２の部分が、該基底領域の該開口部中に位置する誘電体壁部からなる請求項１に記載の装置。

【請求項５】前記筐体の前記第２の部分が、少なくとも部分的に開口しており、ガスおよび流体の測定を可能にしている請求項１に記載の装置。

【請求項６】各ｒｆ共振器の前記筐体の前記第１の部分が、平らな基底領域の１つが完全にまたは部分的に開いた円柱状金属からなり、円柱状部分の直径が、該筐体のカットオフ波長の２分の１である請求項１に記載の装置。

2

【請求項７】前記ｒｆ共振器の前記同調手段が、誘電体、磁性体、または金属からなる同調体を前記筐体の中に有し、該同調体の前記固体共振器に対する位置が、手動で変化可能であるか、または前記制御分析手段によって制御される請求項１に記載の装置。

【請求項８】前記ｒｆ共振器の前記同調手段が、誘電体、磁性体、または金属からなる同調体を前記筐体の中に有し、該同調体の誘電体、磁気、または金属特性が前記制御分析手段からの制御信号によって変化可能である請求項１に記載の装置。

【請求項９】前記ｒｆ共振器の両方が、前記測定される物質の上方に同じ高さで位置し、かつ互いに隣接し、その結果前記筐体の前記第２の部分が該測定される物質に対向している請求項１に記載の装置。

【請求項１０】前記誘電共振器の各々が、金属酸化物セラミック材料、好ましくは$BaO-PbO-Nd_2O_3-TiO_2$、金属チタネート、特にＳｎ－チタネートまたはＺｒ－チタネート、Ｂａの他に更に金属Ｚｒ、ＳｎまたはＴａを含有する混合酸化物、または$MgTiO_3-CaTiO_3$からなる請求項１に記載の装置。

【請求項１１】前記２つの共振器の他に、前記ｒｆ送信手段および前記制御分析手段に該２つの共振器と同様に結合され、互いに同一構造を有する第２のｒｆ共振器対を備えており、該第２のｒｆ共振器対は、該２つのｒｆ共振器に独立して、基準媒体に対向可能である請求項１に記載の装置。

【請求項１２】物質の存在に起因するｒｆ共振器の離調量を分析することによって、該物質の複素誘電率を測定するための方法であって、

任意の選択された周波数の高周波の電磁場がｒｆ共振器に結合され、共振器フィールドが受信手段によって検知され、受け取られたｒｆ信号の振幅が測定手段によって決定され、

２つのｒｆ共振器を用い、該ｒｆ共振器の各々は、第１の部分と第２の部分とを備えている筐体の中に誘電固体共振器を有し、該第１の部分は、導体材料によって該固体共振器を少なくとも１つの半球領域において囲んでおり、該第２の部分は、交流電磁フィールドに対して透過性を有しており、該２つのｒｆ共振器は、該第２の部分の各々が該物質に対向するように、かつ該第１の部分の各々が該第２の部分から由来する電磁フィールドに起因する相互作用からシールドするように該測定される物質に対して方向付けられ、

同調手段を用いて、該測定される物質が存在しない場合には第１および第２のｒｆ共振器がそれぞれ異なる第１の共振周波数（ω_{o1}）および第２の共振周波数（ω_{o2}）を有するように該第１および第２のｒｆ共振器を同調し、該第２の周波数は該第１の周波数と異なり、かつ第１の共振周波数（ω_{o1}）および第２の共振周波数（ω_{o2}）の中間に位置する周波数（ω）を有する電磁フ

ィールドを、該ｒｆ共振器の両方に供給し、
該２つのｒｆ共振器中の該受け取ったｒｆ信号の振幅の測定値を制御分析手段に供給し、かつ該制御分析手段において、該測定される物質の該誘電率を、該測定された振幅値の和および差値に基づいて所定の関係を用いて決定することを特徴とする方法。

【請求項１３】以下の式の所定の関係を用いることを特徴とする請求項１２に記載の方法：

【数１】

$$\Delta\varepsilon' \propto \frac{F1-F2}{F1_0+F2_0}$$

【数２】

$$\Delta\varepsilon'' \propto \frac{F1_0+F2_0-(F1+F2)}{F1_0+F2_0}$$

ここで、Ｆ１およびＦ２は、前記第１および第２のｒｆ共振器が前記測定されるべき物質に向けられたときの該第１および第２のｒｆ共振器の各々の前記受け取ったｒｆ信号の前記振幅値であり、Ｆ１$_0$およびＦ２$_0$は、該測定すべき物質が存在しない場合に対応する振幅である。

【請求項１４】前記所定の関係として、予め実証的に決定された較正曲線を用いることを特徴とする請求項１２に記載の方法。

【請求項１５】前記２つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、該第２の共振器対を基準媒体に向け、該第２の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項１２に記載の方法。

【請求項１６】前記２つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、該第２のｒｆ共振器対を空の空間に向け、該第２の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項１２に記載の方法。

【請求項１７】前記２つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、該第２のｒｆ共振器対を前記測定すべき媒体の乾燥試料に向け、該第２の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項１２に記載の方法。

【請求項１８】前記２つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、該第２のｒｆ共振器対を前記測定すべき媒体の既知の湿度を有する試料に向け、該第２の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項１２に記載の方法。

【請求項１９】前記２つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、該第２のｒｆ共振器対を前記測定すべき物質の既知の厚さを有する誘電体層に向け、該第２の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項１５に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【産業上の利用分野】本発明は、試料の存在に起因するｒｆ共振器離調量の分析によって、試料の複素誘電率を決定する方法およびその装置に関する。本発明の装置は、選択された周波数のｒｆ電磁場をｒｆ共振器中に送るためのｒｆ送信機システムと、共振器フィールドのためのｒｆ受信システムと、前記ｒｆ受信システムに接続され、受け取ったｒｆ信号の振幅を決定する測定ユニットとを備えている。

【０００２】

【従来の技術】誘電体の特性を決定するための方法が幾つか知られている。それらの方法において、誘電特性は典型的には、相対誘電率ε_rとロス角ｔａｎ（δ）とを用いて、または複素誘電率$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$として記述される。これらの方法は、例えば、材料の湿度を決定するために用いられる。このような方法は、試料に含有される水分の持つ大きな誘電率および大きなロス角を利用するものであり、産業利用において、化学物質、食品、タバコ、コーヒーなどの湿度測定など重要な役割を果たしている。マイクロ波共振法を湿度測定に応用する場合、測定する試料を空洞共振器内に置き、試料の存在に起因する離調量を、ｒｆ周波数の変化および共振曲線のサンプリングによって測定する。共振器の共振周波数の同調のシフトおよび、共振帯幅の増加または特性係数から、試料の誘電率を、その物質の既知の組成および密度について、推定し得る。通常、これは、前もって各試料を異なる湿度含有量において測定することによって得られる較正曲線を必要とする。公知の方法の大部分は、密度の較正測定を更に必要とする。

【０００３】ＤＥ－ＯＳ　４０　０４　１１９に、空洞共振器を用いて湿度を決定する方法が開示されている。この方法によれば、試験する試料内のフィールド構成を適宜選択することにより、湿度および密度を独立に決定する。共振周波数および共振帯幅は、完全な共振曲線をサンプリングすることにより決定分析される。この場合、試料を空洞共振器内に置くことがやはり必要である。

【０００４】Ｅ．Ｗｅｈｒｓｄｏｒｆｅｒらによる論文「マイクロ波帯域での光学結晶測定のための誘電率測定場所」Ｋｒｉｓｔａｌｌ　ｕｎｄ　Ｔｅｃｈｎｉｋ（”結晶と技術”）、Ｂｄ．１０、Ｎｒ．６　１９７５、ｐｐ．６９５－７００に、上記と同様な方法が開示されている。この方法によれば、マイクロ波帯域の周波数中に

おいて作動される空洞共振器に負荷をかけることによって、試料の誘電率を決定する。試料の存在に起因する共振周波数および特性係数の変化を、試料に照射した後の共振曲線を測定することによって決定する。

【０００５】

【発明が解決しようとする課題】産業利用のほとんどにおいて、公知の共振による物質の誘電特性決定法は、測定する試料を、厳密に規定された条件下で共振器内に置かなければならないという欠点を有する。連続的な製造生産過程において、これら公知の方法においては、ランダムサンプル測定を用いて、比較的多大な手間をかけて空洞共振器内で測定出来るのみである。このようなランダムサンプル測定では、調べたい測定量に対し、必ず時間の遅れが出る。更に、物質特性が、測定されるべき物質の流れに比較して、試料が採取された時点とその後の測定との間に変化しないという保証はない。連続的な製造生産過程において、誘電測定量の瞬間値およびそこから推定された湿度などの瞬間値に、連続的にアクセス出来ることが好ましい。しかし、これは、空洞共振器を用いる方法では基本的に不可能である。

【０００６】ＤＤ－ＰＳ　１３８　４６８に、片面を金属化した誘電体板の複素誘電率の測定方法が開示されている。測定は、E_{011}－モードで励起した誘電共振器を、上記板の金属化されていない方の面に設置して行う。金属化された方の面は、共振系の終端として機能する。共振器を直接金属板上に置いた場合の共振周波数の変化から、この板状材料の誘電率を、既知の厚さについて決定し得る。この方法の欠点は、片面を金属化した板のみ測定可能である点である。更に、共振周波数を決定するためには、測定毎に完全な共振曲線をサンプリングしなければならない。

【０００７】共振器フィールドと共振器の外側に位置する物質との間の相互作用を妨げないような「開いた」空洞共振器を用いた実験、例えばスロット状の開口部を有するチャンバ等、でも、満足な結果は得られなかった。何故なら、これらの実験では比較的感度が低く、また、照射されるマイクロ波の量が比較的高レベルであるためである。

【０００８】更に、如何なる公知のセンサデバイスも、共振器内に照射される異なる周波数で多数の測定ポイントを用いることによってこれらの測定ポイントから共振曲線を決定し、そこから共振器周波数および帯域幅を最終的に決定しなければならないという欠点を有するため、望ましくない。この方法は、異なる周波数において多数の測定量を取得し、格納後に分析しなければならないため、回路において相当な手間を要する。

【０００９】本発明の１つの目的は、物質の存在に起因するｒｆ共振器離調量の分析によって前記物質の誘電特性を決定する方法および装置であって、調べたい誘電特性を連続的かつ遅延なく決定することを可能にする方法

および装置を提供することである。

【００１０】本発明の他の目的は、簡単な分析回路を用いて物質の誘電特性を決定する方法および装置を提供することである。

【００１１】本発明の他の目的は、材料の湿度および密度または材料層の厚さを決定するために、物質の誘電特性を決定する方法および装置を提供することである。

【００１２】

【課題を解決するための手段】本発明によれば、物質の存在に起因するｒｆ共振器の離調量を分析することによって、前記物質の複素誘電率を決定するための装置であって、前記装置は、可変高周波数の電磁場をｒｆ共振器に送るためのｒｆ送信手段と、共振器フィールドのための受信手段と、前記受信手段に接続され、受け取ったｒｆ信号の振幅を決定するための測定手段とを備えており、前記装置は、同一構造を有する２つのｒｆ共振器を有し、前記ｒｆ共振器の各々は、第１の部分と第２の部分とを備えている筐体の中に誘電固体共振器を有し、前記第１の部分は、導体材料によって前記固体共振器を少なくとも１つの半球領域において囲んでおり、前記第２の部分は、交流電磁フィールドに対して透過性を有しており、かつ前記ｒｆ共振器の各々は前記ｒｆ共振器の共振周波数を調整するための手段を有しており、前記２つのｒｆ共振器は、導体からなる前記第１の部分の各々が前記ｒｆ共振器を相互作用からシールドするように、かつ交流電磁フィールドに対して透過性を有している前記第２の部分が前記測定すべき物質に対向するような相対位置に位置するように調節され、前記装置は更に、前記ｒｆ共振器の両方に同一周波数（ω）を有するｒｆフィールドが供給されるように前記ｒｆ送信手段および／または前記ｒｆ共振器を制御するように、かつ前記周波数（ω）が、異なる値に前もって調整された前記第１および第２のｒｆ共振器の共振周波数（ω_{o1}およびω_{o2}）の中間に、前記測定される物質が存在しない場合には位置するように調節される制御分析手段を備えており、前記制御分析手段は前記受け取ったｒｆ信号の各々の振幅の測定値を受け取り、かつ前記振幅の測定値の和および差値から前記複素誘電率を決定するように調整され、そのことにより、上記目的が達成される。

【００１３】好ましくは、前記筐体の前記第２の部分が、誘電体からなっていてもよい。好ましくは、前記筐体の誘電体からなる前記第２の部分が、プラスチックまたはセラミック材料からなっていてもよい。

【００１４】好ましくは、各ｒｆ共振器の前記筐体の前記第１の部分が、平らな基底領域の１つが完全にまたは部分的に開いた円柱状金属からなり、前記第２の部分が、前記基底領域の前記開口部中に位置する誘電体壁部からなっていてもよい。

【００１５】好ましくは、前記筐体の前記第２の部分が、少なくとも部分的に開口しており、ガスおよび流体

の測定を可能にしていてもよい。

【００１６】好ましくは、各ｒｆ共振器の前記筐体の前記第１の部分が、平らな基底領域の１つが完全にまたは部分的に開いた円柱状金属からなり、円柱状部分の直径が、前記筐体のカットオフ波長の２分の１であってもよい。

【００１７】好ましくは、前記ｒｆ共振器の前記同調手段が、誘電体、磁性体、または金属からなる同調体を前記筐体の中に有し、前記同調体の前記固体共振器に対する位置が、手動で変化可能であるか、または前記制御分析手段によって制御されてもよい。

【００１８】好ましくは、前記ｒｆ共振器の前記同調手段が、誘電体、磁性体、または金属からなる同調体を前記筐体の中に有し、前記同調体の誘電体、磁気、または金属特性が前記制御分析手段からの制御信号によって変化可能であってもよい。

【００１９】好ましくは、前記ｒｆ共振器の両方が、前記測定される物質の上方に同じ高さで位置し、かつ互いに隣接し、その結果前記筐体の前記第２の部分が前記測定される物質に対向していてもよい。

【００２０】好ましくは、前記誘電共振器の各々が、金属酸化物セラミック材料、好ましくはＢａＯ－ＰｂＯ－Nd_2O_3－TiO_2、金属チタネート、特にＳｎ－チタネートまたはＺｒ－チタネート、Ｂａの他に更に金属Ｚｒ、ＳｎまたはＴａを含有する混合酸化物、または$MgTiO_3$－$CaTiO_3$からなっていてもよい。

【００２１】好ましくは、前記２つの共振器の他に、前記ｒｆ送信手段および前記制御分析手段に前記２つの共振器と同様に結合され、互いに同一構造を有する第２のｒｆ共振器対を備えており、前記第２のｒｆ共振器対は、前記２つのｒｆ共振器に独立して、基準媒体に対向可能であってもよい。

【００２２】本発明による方法は、物質の存在に起因するｒｆ共振器の離調量を分析することによって、前記物質の複素誘電率を測定するための方法であって、任意の選択された周波数の高周波の電磁場がｒｆ共振器に結合され、共振器フィールドが受信手段によって検知され、受け取られたｒｆ信号の振幅が測定手段によって決定され、２つのｒｆ共振器を用い、前記ｒｆ共振器の各々は、第１の部分と第２の部分とを備えている筐体の中に誘電固体共振器を有し、前記第１の部分は、導体材料によって前記固体共振器を少なくとも１つの半球領域において囲んでおり、前記第２の部分は、交流電磁フィールドに対して透過性を有しており、前記２つのｒｆ共振器は、前記第２の部分の各々が前記物質に対向するように、かつ前記第１の部分の各々が前記第２の部分から由来する電磁フィールドに起因する相互作用からシールドするように前記測定される物質に対して方向付けられ、同調手段を用いて、前記測定される物質が存在しない場合には第１および第２のｒｆ共振器がそれぞれ異なる第

１の共振周波数（ω_{o1}）および第２の共振周波数（ω_{o2}）を有するように前記第１および第２のｒｆ共振器を同調し、前記第２の周波数は前記第１の周波数と異なり、かつ第１の共振周波数（ω_{o1}）および第２の共振周波数（ω_{o2}）の中間に位置する周波数（ω）を有する電磁フィールドを、前記ｒｆ共振器の両方に供給し、前記２つのｒｆ共振器中の前記受け取ったｒｆ信号の振幅の測定値を制御分析手段に供給し、かつ前記制御分析手段において、前記測定される物質の前記誘電率を、前記測定された振幅値の和および差値に基づいて所定の関係を用いて決定し、そのことにより、上記目的が達成される。

【００２３】好ましくは、以下の式の所定の関係を用いてもよい。

【００２４】

【数３】

$$\Delta\varepsilon' \propto \frac{F1-F2}{F1_o+F2_o}$$

【００２５】

【数４】

$$\Delta\varepsilon'' \propto \frac{F1_o+F2_o-(F1+F2)}{F1_o+F2_o}$$

【００２６】ここで、Ｆ１およびＦ２は、前記第１および第２のｒｆ共振器が前記測定されるべき物質に向けられたときの前記第１および第２のｒｆ共振器の各々の前記受け取ったｒｆ信号の前記振幅値であり、$F1_o$および$F2_o$は、前記測定すべき物質が存在しない場合に対応する振幅である。

【００２７】好ましくは、前記所定の関係として、予め実証的に決定された較正曲線を用いてもよい。

【００２８】好ましくは、前記２つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、前記第２の共振器対を基準媒体に向け、前記第２の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【００２９】好ましくは、前記２つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、前記第２のｒｆ共振器対を空の空間に向け、前記第２の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【００３０】好ましくは、前記２つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、前記第２のｒｆ共振器対を前記測定すべき媒体の乾燥試料に向け、前記第２の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【００３１】好ましくは、前記２つの共振器と同一の構

造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、前記第２のｒｆ共振器対を前記測定すべき媒体の既知の湿度を有する試料に向け、前記第２の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【００３２】好ましくは、前記２つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数（ω）を供給され、検知されたｒｆ信号が前記制御分析手段によって前記２つのｒｆ共振器と同様に分析される第２のｒｆ共振器対を用い、前記第２のｒｆ共振器対を前記測定すべき物質の既知の厚さを有する誘電体層に向け、前記第２の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【００３３】

【作用】本発明によれば、同一構造を有する２つのｒｆ共振器が、測定すべき試料の誘電特性の測定のために用いられる。この２つのｒｆ共振器は、誘電固体ｒｆ共振器を備えている。固体共振器は、誘電物質の特性のｒｆ測定デバイスのアプリケーションのための要件を満たす特性を有することが確認されている。すなわち、電磁場が、誘電体共振器の内部に閉じこめられず、消失しないフィールドが共振器ボディの外部に存続する。外部フィールドは、急速に減衰するため、電磁場エネルギーの放射に起因して問題が起こることはない。一方で、共振器外部の消失しないフィールドのために、共振器近傍に存在する物質に対し、十分な感度が得られる。測定された信号は、固体共振器近傍に設けられた受信手段中に誘導されたものであり、これら信号は、波高値整流などの公知の測定回路によって復調され得る。

【００３４】上記各固体共振器は、筐体中に位置している。筐体は、少なくとも１つの半球領域を囲む第１部分では導体からなり、第２の部分においては電磁場に対して透過性を有する物質からなる。両ｒｆ共振器は、導体からなる各筐体部分が前記固体共振器を相互作用からシールドし、かつ、透過性を有する部分が測定される物質に向けられるような相対位置を有する。これら導体筐体部分を用いて固体共振器を互いにシールドすることが好ましい理由は、両ｒｆ共振器が、互いに近く位置させられることによって、測定される物質の同一領域または近接する領域に向けられるためである。

【００３５】同一のｒｆフィールドが、両ｒｆ共振器中に結合される。すなわち、両共振器は、同じ周波数で作動される。この周波数は、測定すべき物質の非存在下において、第１の共振器の共振器周波数と、第１の共振器の共振器周波数とは異なる予め調整された第２の共振器の共振器周波数との、丁度中間に位置するように選択される。測定すべき物質の存在に起因する離調により、両共振曲線がシフトし、一定の定動作周波数における対応する共振曲線上の動作点がシフトし、同時に、両共振器の帯域幅が拡張され（特性係数の変化）、この両効果に

より、共振フィールドの測定振幅値が影響される。測定すべき物質の存在下において、両共振器で測定されたフィールドの和および差をとることにより、この物質の誘電特性を完全に決定することが可能である。この評価は、測定された振幅値を受け取り、その和値および差値を計算し、その関係を示す分析式を複素誘電率または実証的に得られた較正曲線に対して用いる制御分析手段中で行われる。

【００３６】

【実施例】図１は、本発明の装置のためのｒｆ共振器を単体で示している。このｒｆ共振器は、銅からなる第１の部分（筐体）２および第２の部分（筐体）３を有する円柱状のハウジングを備えている。第２部分は、円柱表面の平面の１つを規定し、電磁波に対し透過性を有する。第２部分は、例えばセラミックまたはプラスチック材料からなる。筐体２および３の内部には、円盤状の誘電共振器１を有する。本実施例では、誘電共振器１は、基底面（筐体）３に直接取り付けられているが、任意の手段を用いることにより、ハウジング内部の他の部分に配置されてもよい。電磁ｒｆフィールドを誘電共振器１内に結合するため、および共振器フィールドの検知のために、同軸ケーブル４ａおよび４ｂがそれぞれ筐体２の対向する面に設けられており、同軸ケーブル４ａおよび４ｂの誘電共振器側の一端は、結合ループ５ａおよび５ｂで終わっている。結合ループ５ａおよび５ｂは、中心の導体と同軸ケーブルシールド４ａおよび４ｂとの間にそれぞれ単純な導体ループを形成している。これらの導体ループ（結合ループ）５ａおよび５ｂは、それぞれ送信手段および受信手段として機能する。

【００３７】回転対称固体共振器、特に半径ａおよび高さｈの円盤状共振器のレイアウトに関して、以下の考察がなされる。共振器内部の磁場のｚ成分について、

【００３８】

【数５】

$$H_z \propto J_0(k_\rho r)$$

【００３９】の式を仮定し、共振器外部の磁場のｚ成分において、

【００４０】

【数６】

$$H_z \propto K_0(hr)$$

【００４１】を仮定する。ただし、ｋ$_{\rho}$およびｉｈは、（それぞれ）共振器内部および外部でのカットオフ波番号であり、Ｊ$_0$およびＫ$_0$は、（それぞれ）実数および虚数論における０次ベッセル関数である。カットオフ波数は、共振波数βおよび真空における波数ｋに対し、以下の関係を有する：

【００４２】

【数７】

$$\beta_c^2 = k^2 - \beta^2$$

【００４３】ｒ方向およびｚ方向において、以下の境界

11

条件が実質的に満たされなければならない：

【００４４】

【数８】

$$\beta_d^2 = \left(\frac{p_{01}}{a}\right)^2, \quad \beta^2 = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2$$

【００４５】ただし、P_{01}は、J_0の第１根（the first root）である。更に、

【００４６】

【数９】

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} = \omega^2\mu_r\mu_0\varepsilon_r\varepsilon_0 = \kappa k_0^2, \quad \kappa = \varepsilon_r\mu_r$$

【００４７】である。

【００４８】Ｌ＝ａ、周波数２．５ＧＨｚ、共振器のε_r＝３８、およびP_{01}＝２．４０５であると仮定すると、

【００４９】

【数１０】

$$k^2 = \frac{\pi^2}{a^2} + \frac{p_{01}^2}{a^2} = \frac{(2\pi f)^2}{c^2}\varepsilon_r$$

【００５０】から、ａ＝Ｌ＝１２．２５ｍｍである共振器レイアウトが得られる。

【００５１】更に、ｒｆ共振器中に、共振器周波数を調整するための同調手段（不図示）が設けられる。前記同調手段は、例えば、誘電共振器に対し位置調整可能な同調体からなる。最も単純には、同調手段は、金属筐体２および３内に所望の深さまで回し入れることによって、誘電共振器から所望の距離に達せられるような金属ネジである。また、一般に、誘電体または磁気同調体を用いることも可能である。そのような同調体の位置は、手動または、制御分析ユニットからの外部信号によって制御される駆動機構によって調整可能である。または、位置固定された同調体を用いてもよく、その場合、同調体の誘電特性、磁気特性、または金属特性は電気制御信号によって変化させることができ、その結果、ｒｆ共振器の共振周波数の調整が可能になる。

【００５２】誘電共振器１への入出力のための結合ループ５ａおよび５ｂは、対称的な構成を有し、任意に送信器または受信器として選択され得るように構成される。ループ５ｂを受信ループと考えた場合、ループ５ｂ中に固体共振器１のフィールドによって誘導された信号は、測定回路に与えられる。測定回路は、例えば波高値整流などにより、共振器フィールドの振幅に比例した信号を生成する。この信号は、アナログ／デジタル変換後、続いて制御分析ユニットによって更に分析される。制御分析ユニットは、典型的にはマイクロプロセッサを有する。

【００５３】以下に、図６に示す２つの対称な共振器からなる共振器群の近傍に置かれた物質の誘電特性と、本発明における共振器群からの信号の和および差との特徴的な関係を、単体のｒｆ共振器の等価回路を用いて説明

12

する。図３に、その等価回路をＲＬＣ回路として示す。２つのループによるｒｆフィールド結合は、トランス回路として示され得る。入出力結合ループは、固体共振器の対角線上の対向する位置に設けられているため、並列トランスと見なし得る。この２つを、相互インダクタンスＭで結合すると、図３の等価回路が得られる。ここで、回路中に示されるインピーダンス群は、以下の定義を有する。

【００５４】

R_G　ｒｆ発生器の電源抵抗（定電流源）

L_0　結合ループインダクタンス

Ｌ　共振器インダクタンス

Ｍ　相互結合インダクタンス

Ｃ　共振容量

R_i　共振内部抵抗

R_{out}　出力抵抗

結合ループ５ａは、誘電共振器１の漂遊フィールド内部に完全に含まれるため、巻き数を１とすると、

【００５５】

【数１１】

$$M = L_0$$

【００５６】と仮定できる。

【００５７】更に、

【００５８】

【数１２】

$$R_{out} >> \omega M$$

【００５９】

【数１３】

$$R_G >> \omega M$$

【００６０】と仮定できる。

【００６１】これらの仮定に基づき、図３の等価回路は単純化され、図４に示す等価回路となる。

【００６２】次のステップにおいて、図４右側の並列インピーダンスは、

【００６３】

【数１４】

$$\omega C R_i = Q_i >> 1$$

【００６４】という仮定の下において、以下の等価直列インピーダンスに変換される。

【００６５】

【数１５】

$$Z_s = \frac{1}{\omega^2 C^2 R_i} - j\frac{1}{\omega C}$$

【００６６】上記の結果、図５に示す等価回路が得られる。この回路の入力インピーダンスは、

【００６７】

【数１６】

13

$$Z_{in} = j\omega M + \frac{\omega^2 M \left[\frac{1}{\omega^2 C^2 R_i} - j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \right]}{\left(\frac{1}{\omega^2 C^2 R_i}\right)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

【００６８】となる。

【００６９】共振近傍においては、上記式の第１項は、上記式の第２項に比べて無視できる。以下に示すように入力インピーダンス絶対値を導くことができる。

【００７０】

【数１７】

$$|Z_{in}| = \frac{\omega^4 M^2 C^2 R_i}{\sqrt{1 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 (\omega^2 C^2 R_i)^2}}$$

【００７１】ここで、

【００７２】

【数１８】

$$\omega^2 C^2 R_i = \frac{\frac{\omega C}{G_i}}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{Q_i}{\frac{1}{\omega C}} \gg 1$$

【００７３】を用いている。

【００７４】これは、一方では、無負荷の誘電共振器の有する高Q_i値に起因する。また一方では、共振周波数近傍において、１／Ｃ値はＬの値に近い。後者の量Ｌは、以下の理由により容易に決定し得る。すなわち、半径ａおよび高さｈを有する円盤状誘電共振器のインダクタンスは、実質的に、

【００７５】

【数１９】

$$L = \mu_0 a \left(\ln\frac{a}{h} + \frac{3}{2}\right)$$

【００７６】と与えられるからである。上記式に、典型値ａ＝６ｍｍ、ｈ＝４ｍｍ、および周波数２．５ＧＨｚを代入すると、

【００７７】

【数２０】

$$\omega L = 225\ \Omega$$

【００７８】を得る。

【００７９】上記表現を入力インピーダンス$|Z_{in}|$につき、共振周波数ω_0の周囲でテイラー級数展開することにより、

【００８０】

【数２１】

$$|Z_{in}| = \omega^4 M^2 C^2 R_i \left[1 - 2Q_i^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2\right]$$

【００８１】が得られる。ここで、

【００８２】

【数２２】

$$Q_i = \omega_0 C R_i$$

【００８３】を用いている。

【００８４】更に、以下に定義する結合係数ｋが導入される：

14

【００８５】

【数２３】

$$k = \frac{M}{L} = \frac{L_0}{L}$$

【００８６】式中、上記式ではＭをＬ$_0$で近似している。ループ半径ｂおよびコンダクタ半径ｒを有する結合ループのインダクタンスＬ$_0$は、

【００８７】

【数２４】

$$L_0 = \mu_0 b \left(\ln\frac{b}{r} + \frac{1}{4}\right)$$

【００８８】で与えられる。

【００８９】周波数２．５ＧＨｚ、ｂ＝１．５ｍｍ、およびｒ＝０．５ｍｍにおいて、Ｌ$_0$＝３９が得られる。このとき、結合係数ｋは、０．１７７と定義する。

【００９０】ｋの上記定義を、$|Z_{in}|$の式に挿入すると、

【００９１】

【数２５】

$$|Z_{in}| = k^2 \frac{\omega_0^4}{\omega^4} R_i \left[1 - 2Q_i^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2\right]$$

【００９２】が得られる。

【００９３】最後に、出力抵抗R_{out}が、後に考慮される。R_iは、

【００９４】

【数２６】

$$R_i = Q_i \frac{1}{\omega_0 C} = 2000 \cdot 225\Omega = 450k\Omega$$

【００９５】で与えられる高い値を有するため、上記$|Z_{in}|$の式中、カッコ（［）の前の係数全体は、これが十分小さいと仮定された場合、出力抵抗に等しくなる。これにより、最終的に、

【００９６】

【数２７】

$$|Z_{in}| = R_{out}\left[1 - 2Q_i^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2\right]$$

【００９７】が得られる。

【００９８】上記の関係から、固体共振器の近傍に置かれた測定すべき試料による影響が推定され得る。共振周波数ω_0近傍における$|Z_{in}|$のε'の小さい変化の影響、すなわち$\Delta\omega = \omega - \omega_0 << \omega'_0$は、共振器の近傍に置かれた測定すべき試料に起因するため、以下のように示される。

【００９９】

【数２８】

$$\frac{d|Z_{in}|}{d\varepsilon'} = \frac{d|Z_{in}|}{d\omega_0}\frac{d\omega_0}{d\varepsilon'} = -2R_{out}Q_i^2 \frac{d}{d\omega_0}\left(\frac{\omega-\omega_0}{\omega_0}\right)^2 \frac{d\omega_0}{d\varepsilon'}$$
$$= 4R_{out}Q_i^2 \frac{\omega(\omega-\omega_0)}{\omega_0^3}\frac{d\omega_0}{d\varepsilon'}$$

【０１００】ここで、以下の関係

【０１０１】

【数２９】

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC_0\varepsilon'}}$$

【０１０２】

【数３０】

$$\frac{d\omega_0}{d\varepsilon'} = -\frac{1}{2}\omega_0\frac{1}{\varepsilon'}$$

【０１０３】を考慮すると、最終的に、

【０１０４】

【数３１】

$$\Delta|Z_{in}| = -2R_{out}Q_l^2\frac{\omega-\omega_0}{\omega_0}\frac{1}{\varepsilon'}\Delta\varepsilon' \propto \Delta\varepsilon'$$

【０１０５】が得られる。

【０１０６】ここで、ε’が増加する場合の｜Ｚ$_{in}$｜の変化の符号は、共振周波数ω$_0$が動作周波数ωより高いか低いかに依存することに注意する。すなわち、動作周波数ωの上下対称に動作する２つの共振器の場合、共振器信号の差Ｆ１－Ｆ２は、Δε’に比例する。

【０１０７】ここで、誘電率の虚数部の変化に起因する影響を考慮する。虚数部ε”は既に上記式、

【０１０８】

【数３２】

$$|Z_{in}| = R_{out}[1-2Q_l^2(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})^2]$$

【０１０９】中に、Ｑ$_l$に以下のように隠れて含まれている。

【０１１０】

【数３３】

$$Q_l = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''}$$

【０１１１】これより、

【０１１２】

【数３４】

$$|Z_{in}| = R_{out}[1-2\frac{\varepsilon'^2}{\varepsilon''^2}(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})^2]$$

【０１１３】となる。これより、ε”にともなう｜Ｚ$_{in}$｜の変化は、

【０１１４】

【数３５】

$$\Delta|Z_{in}| = \frac{d|Z_{in}|}{d\varepsilon''}\Delta\varepsilon'' = -4R_{out}\frac{\varepsilon'^2}{\varepsilon''^3}(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})^2\Delta\varepsilon'' \propto \Delta\varepsilon''$$

【０１１５】となる。

【０１１６】ここで、上記｜Ｚ$_{in}$｜のε’依存性とは対照的に、ε”が変化した場合の｜Ｚ$_{in}$｜符号は、共振器が共振周波数ω$_0$の上で動作するか下で動作するかに依存しないことに注意しなければならない。その結果、動作周波数ωの上下対称に同調された２つの共振器の場合、共振器信号の和はΔε”に比例すると推定される。

上記から明らかなように、符号の反転によってε’の変化の効果は前記和の中で互いを相殺し、和はε”の変化のみに依存するようになる。

【０１１７】Δε’に上記のように比例する前記差は、ε”の変化に影響されない。何故なら、ε”の変化は、第１および第２の共振器において同符号で起こり、その結果差をとることにより互いを相殺するからである。

【０１１８】要約すれば、対称な１対の共振器により、測定信号Ｆ１およびＦ２の和および差は、互いに”直交(orthogonal)”し、ε’とε”とに起因する効果は結びつかない。これら和および差は、

【０１１９】

【数３６】

$$\Delta\varepsilon' \propto \frac{F1-F2}{F1_0+F2_0}$$

【０１２０】

【数３７】

$$\Delta\varepsilon'' \propto \frac{F1_0+F2_0-(F1+F2)}{F1_0+F2_0}$$

【０１２１】によって正規化されてもよい。式中、Ｆ１$_0$およびＦ２$_0$は、第１および第２の共振器からの無負荷時、すなわち測定すべき物質が存在しない場合の、共振器信号である。

【０１２２】図６は、２つの隣接するｒｆ共振器８および８’を示している。図中、フィールド透過性部分（筐体）３および３’は、測定すべき試料１０に面しており、導体である筐体部分２および２’は、共振器フィールドの相互作用を防ぐシールド機能を有する。金属筐体部分２および２’により、共振器１および１’の上方の半球領域がシールドされる。更に、指向性が実現されるので、誘電共振器１および１’からの共振器フィールドは、測定すべき試料１０に方向付けられる。

【０１２３】ｒｆ共振器８および８’には、結合ループ（図１中４ａ）を介して、周波数ωである同一ｒｆフィールドを供給される。各ｒｆ共振器８および８’は、無負荷時（測定すべき物質が存在しない場合）において異なる共振周波数ω$_{o1}$およびω$_{o2}$を有するように、予め調整されている。この調整は、前記同調手段によって行われる。一定の動作周波数ωは、共振周波数ω$_{o1}$およびω$_{o2}$の中間に位置するように調整される。これらの関係を図７に示す。図中、太破線（太実線）は、測定すべき物質が共振器の前に存在しない場合の第１（第２）共振器の共振曲線をそれぞれ示す。動作周波数は共振周波数ω$_{o1}$およびω$_{o2}$の丁度中間に位置している。

【０１２４】図６において測定すべき物質が共振器近傍に置かれたとき、細線および細破線によって示される状況が起こる。図中説明を簡単にするため、誘電率の実数部のみに変化が起こる場合、すなわちΔε”＝０を想定している。この場合、共振器群近傍に置かれた物質の影響により、各共振曲線は、動作周波数ωに関する対称位

置から変位する。その結果、各共振器は、固定動作周波数ωに関する対称動作位置、すなわち各共振周波数から同距離の点では動作しなくなり、動作点は、一方の共振曲線においては共振周波数（ω_{o2}）の方に上昇し、他方の共振曲線においては共振周波数（ω_{o1}）から下降する。この動作は、「ε'が変化する場合、$\Delta|Z_{in}|$の変化は、動作周波数の上下に位置する共振周波数について反対方向に起こる」という前記結果に一致する。動作周波数に関して本来対称に動作していたｒｆ共振器は、異なる出力信号Ｆ１およびＦ２（例えば、測定値として、受信ループ５ｂ中に誘導された共振器フィールドの振幅が測定される）を出力する。この共振器群の前に物質が存在することに起因するこの差は、図７においてＦ２－Ｆ１として示される。

【０１２５】図８を参照して、対照的に、物質の存在によって誘電率の虚数部のみに変化が起こる場合、すなわち$\Delta\varepsilon'=0$の場合を考える。この場合、共振曲線は変位せずに、細線および細破線で示すように広がる。従って、共振器は依然として動作周波数ωに関して対称に動作するため、両共振器の信号の差は無くなる。この動作は、「ε"が変化する場合、$\Delta|Z_{in}|$の変化は、動作周波数の上下に位置する共振周波数について同一方向に起こる」という前記結果に一致する。しかし、測定すべき物質が存在しないときのＦ１$_o$およびＦ２$_o$の和と、存在する場合のＦ１およびＦ２の和との間に差が生じる。これらの和の間の差Ｆ１$_o$＋Ｆ２$_o$－（Ｆ１＋Ｆ２）は、測定すべき物質が存在することに起因するε"の変化に比例する。　上記の関係、すなわち

【０１２６】

【数３８】

$$\Delta\varepsilon' \propto \frac{F1-F2}{F1_o+F2_o}$$

【０１２７】

【数３９】

$$\Delta\varepsilon'' \propto \frac{F1_o+F2_o-(F1+F2)}{F1_o+F2_o}$$

【０１２８】は、共振周波数の近傍においてのみ成り立つ。しかし、上記関係は、共振周波数からより遠ざかった場合においても数量信号の振る舞いを正しく記述する。上記分析によって得られたε'とε"との関係が成り立たなくなった場合には、実証的に得た改良較正曲線を制御分析ユニットに格納したものにアクセスすることで代用してもよい。

【０１２９】本発明の特に有用な実施例においては、図６に示す構成に更に１対のセンサ（ループ）を加え、その１対のセンサにも同一動作周波数ωを供給し、この動作周波数に関して対称になるように同調させる。第１のセンサ対は図６に示すように測定すべき試料に向けて設置されるのに対し、第２のセンサ対は、基準媒体に向けて設置される。第２のセンサ対の信号は、第１のセンサ

対と同様の分析処理を受ける。測定すべき試料に向けて設置された第１のセンサ対と基準媒体に向けて設置された第２のセンサ対との比較によって、有用な基準値が得られ、その基準値を用いて装置を較正することが可能である。基準媒体としては、例えば、以下のものが用いられる：

－空の空間（空気）

－既知の特性を有する基準媒体

－物質の湿度を測定したい場合、同物質からなる乾燥試料

－誘電体層の厚さを測定したい場合、既知の厚さを有する同誘電体層

－未知の距離を測定したい場合、誘電体に対する既知の距離

【０１３０】

【発明の効果】本発明によれば、共振曲線のサンプリングを完全に回避でき、両共振器は同一の定周波数で動作し得ることは言うまでもない。この結果、装置が大幅に簡素化される。更に、本発明の装置の周波数の調整は非常に簡単である。すなわち、測定すべき物質の非存在下において、両ｒｆ共振器が同じ振幅を有する出力信号を出力するように、上記ｒｆ共振器の動作周波数および共振周波数は調整される。その結果、各共振器は同一共振曲線がシフトした共振曲線を有しているために、動作周波数が両共振器の共振周波数の丁度中間に位置することが保証される。

【０１３１】本発明によれば、両ｒｆ共振器を、各導体部分によるシールド効果が得られるように、かつ透過性を有する部分を物質の流れに向けて設置することにより、物質の測定を、連続的に、かつ余分な試料を採取する必要なしに行い得る。その結果、物質の流れは、連続的かつ時間的な遅延なしに測定され得る。

【０１３２】本発明の更なる効果は、誘電共振器を用いるため、空洞型共振器に比較してコンパクトかつロバストな構成が可能であることである。

【０１３３】本発明によれば、誘電特性から推定し得る物質の含有湿度の決定において、特別な重要性を有する。また、本発明による方法は、既知の材料からなる層の層厚の決定など、誘電物質の特性に基づく全ての測定および制御に適している。

【図面の簡単な説明】

【図１】誘電共振器を筐体内部に有する単体のｒｆ共振器の軸上の断面を示す図。

【図２】図１のII－II断面を示す図。

【図３】共振器回路の等価回路を示す図。

【図４】共振器回路の等価回路を示す図。

【図５】共振器回路の等価回路を示す図。

【図６】試料の上方に置かれた２つの対称な共振器を示す概略図。

【図７】第１（点線）および第２（実線）の共振器の、

試料の非存在下（太）および試料存在時（細）の、Δε”＝０における共振曲線を示す図。

【図８】第１（点線）および第２（実線）の共振器の、試料の非存在下（太）および試料存在時（細）の、Δε’＝０における共振曲線を示す図。

【符号の説明】

１、１’　誘電共振器

２、２’　筐体の第１の部分

３、３’　筐体の第２の部分

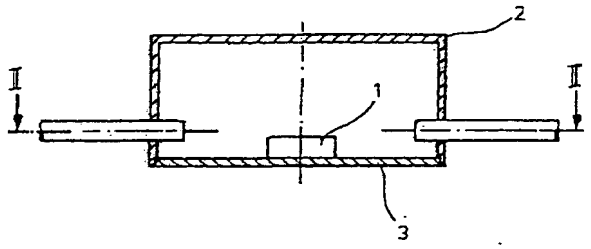
４ａ、４ｂ　同軸ケーブル

５ａ、５ｂ　結合ループ

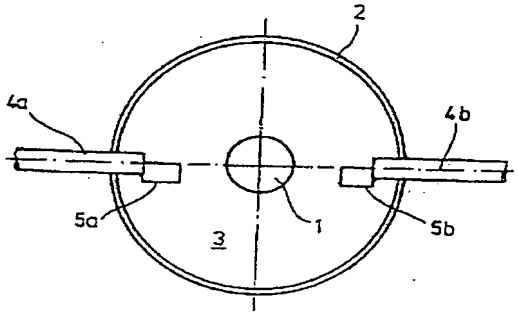
８、８’　ｒｆ共振器

１０　試料

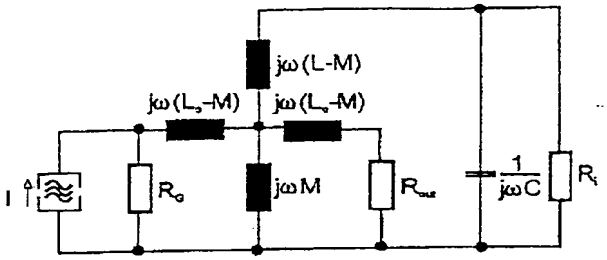
【図１】



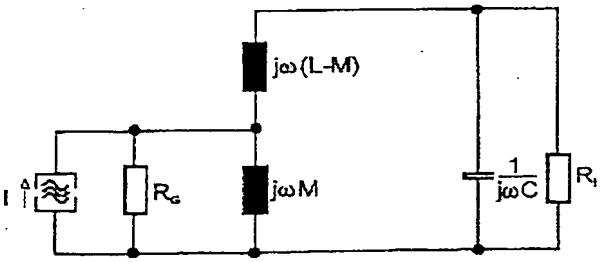
【図２】



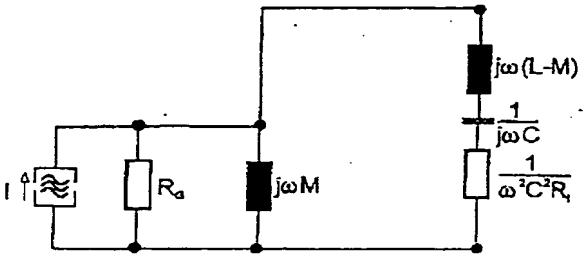
【図３】



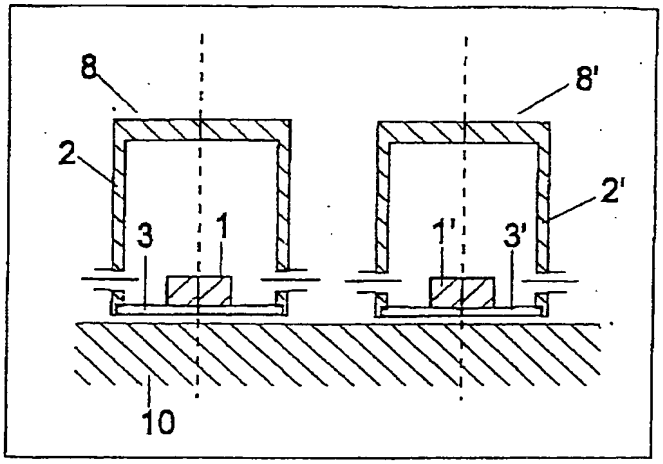
【図４】



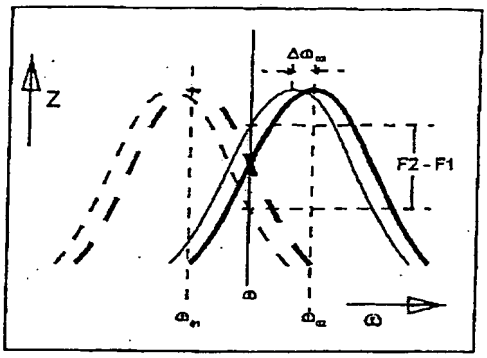
【図５】



【図６】



【図７】



【図８】

